

Artículo/Article
Sección C/Section C
Vol. 14, nro. 1
ID: 2468

Análisis de la producción de maíz en España

José L. Gabriel[1, 2]*, Diana Martín-Lammerding[1], Raúl Allende-Montalbán[1], M. Mar Delgado[1], José A. Rodríguez-Martín[1]
[1]Departamento de Medio Ambiente y Agronomía, INIA-CSIC, Carretera de la Coruña km 7.5, 28040 Madrid, España
[2]CEIGRAM, Universidad Politécnica de Madrid, c/Senda del Rey 15, 28040 Madrid, España
* Corresponding author/ Autor principal: gabriel.jose@inia.es

Analysis of the maize production in Spain

Abstract
Spain is a country where agricultural production has a relatively low weight in the national gross domestic product (only 3.16%), but it is a sector with a great strategic importance, more than 20 million tons of vegetable products exported per year, and a high level of domestic consumption. Within that production, the cultivation of corn is one of the most important crops on the surface within irrigation systems. This study aims to summarize the current situation of maize production in Spain in relation to the world situation. Currently, the two main constraints to increasing the area cultivated with maize and increasing its yield in Spain are the availability of water and the economic profitability. For this reason, this work summarizes the progress achieved until the present, but also the potential improvements that could improve their economic performance without increasing (or even decreasing) their environmental impact. These techniques require inevitably an improvement of the efficiency use of the agronomic inputs (fertilizers, diesel, pesticides, etc.), as well as, the improvement of water use. To achieve these greater efficiencies, different techniques have been identified such as adjusting the doses of water-nutrients-phytosanitary products, their application at right moments or even remote sensing, and the use of precision agriculture; all of them defined in greater detail in this manuscript. Therefore, farmers who wish to continue growing maize in Spain, and being able to improve their yields and reduce their environmental impact, must, above all, improve their production margins.

Keywords: cereals, yield, fertilization, irrigation, economic analysis, sustainable agriculture, precision agriculture.

Resumen
España es un país donde la producción agrícola tiene un peso relativamente bajo en el producto interior bruto nacional (solo del 3,16%), pero con una gran importancia estratégica ya que representa más de 20 millones de toneladas de productos vegetales exportados al año, además del alto nivel de consumo interno. Dentro de esa producción, el cultivo del maíz es uno de los cultivos con mayor importancia en cuanto a superficie dentro de los sistemas de regadío. El presente estudio pretende resumir la situación actual de la producción de maíz en España en relación a la situación mundial. A día de hoy, los dos principales factores limitantes para el aumento de la superficie cultivada de maíz y el aumento de su rendimiento







Editado por / Edited by: Gabriela Albán
Recibido / Received: 14/10/2021
Aceptado / Accepted: 08/01/2022
Publicado en línea / Published online: 16/05/2022

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468



en España son la disponibilidad de agua y la rentabilidad económica. Por eso, este trabajo resume los avances alcanzados hasta la fecha, pero también las mejoras potenciales que permitirían mejorar su rendimiento económico sin aumentar (o incluso disminuyendo) su impacto ambiental. Estas técnicas se basan en la mejora de la eficiencia de uso de los insumos agrícolas empleados (fertilizantes, gasoil, fitosanitarios, entre otros) así como la eficiencia en el uso del agua. Para alcanzar estas mayores eficiencias se han identificado distintas técnicas como el ajuste de las dosis de agua-nutrientes-fitosanitarios, su aplicación en los momentos clave o incluso la teledetección y el uso de agricultura de precisión, todos ellos definidos en mayor detalle en este trabajo. Por eso, los agricultores que deseen seguir cultivando maíz en España, además de ser capaces de mejorar su rendimiento y reducir el impacto ambiental, deberán, sobre todo, mejorar sus márgenes de beneficio.

Palabras clave: cereales, rendimiento, fertilización, regadío, análisis económico, agricultura sostenible, agricultura de precisión.

INTRODUCCIÓN

España es un país con una orografía compleja. Su superficie total es de 505,944 km^2, de los cuales un 14.8% están entre 0 y 200 m de altitud, 33.1% entre 200 y 500 m, 40.6% entre 500 y 1000 m y 11.5% km^2 por encima de los 1000 m de altitud, con picos máximos de 3,715 m en Canarias y de 3,479 en la península [1]. Esta orografía tan marcada, unida a su condición de península, con la influencia en el oeste del Océano Atlántico, en el norte del Mar Cantábrico, en el este del Mar Mediterráneo y en el sur del Estrecho de Gibraltar (todos ellos con aguas de temperaturas muy variadas), generan un sinfín de condiciones edafo-climáticas particulares y diversas (Fig. 1). Bajo estas condiciones, se encuentran climas que van desde el mediterráneo árido, al oceánico, pasando por el continental, el de alta montaña, el subtropical o incluso el tropical en las islas Canarias [2]. Y las precipitaciones medias anuales de las principales capitales de provincia oscilan entre los 200 mm registrados en Almería en el periodo entre 1981-2010, a los 1,791 mm registrados en Vigo para el mismo periodo. Una variabilidad similar se registra en las temperaturas, con medias para el periodo 1981-2010 que oscilan entre los 10.7°C en Soria y 19.2°C en Sevilla (21.5°C en las Islas Canarias), con máximas absolutas de 46°C en Córdoba, pero sólo de 35.2°C en La Coruña, y mínimas absolutas de -20.0°C en Albacete, pero sólo de 0.4°C en Melilla. De hecho, la influencia de la variabilidad interanual propia del clima mediterráneo, genera que estos valores cambien radicalmente de un año a otro. Sin embargo, la característica común para toda la superficie española es el periodo de sequía estival, donde las precipitaciones son muy escasas durante al menos 60 días, mientras que la evapotranspiración potencial es muy elevada debido al viento, las altas temperaturas y las muchas horas de sol diarias. Es precisamente durante este periodo de mayor sequía cuando se cultiva el maíz en España, ya que a lo largo del resto del año hay un elevado riesgo de heladas y un fotoperiodo inadecuado para la floración de determinados cultivares.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468



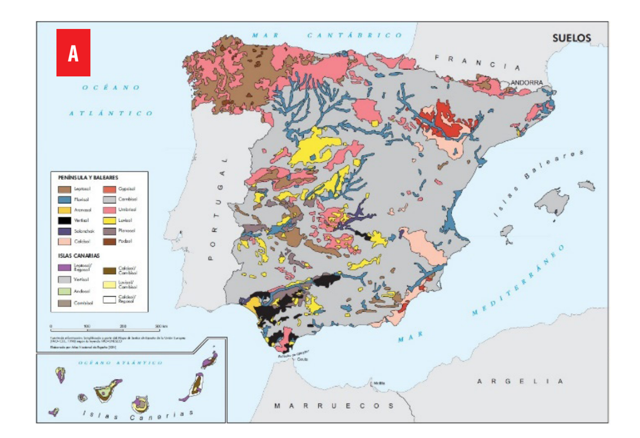




Figura 1. Mapas de suelos (**A**) y climas (**B**) de España. Imágenes del Instituto Geográfico Nacional.

Aunque las precipitaciones no son elevadas, la capacidad de retención de agua en embalses artificiales en España es alta. El aforo total de los embalses en 2018 fue de 56,074 millones de m^3, que, si bien no se alcanza en la práctica casi ningún año, al combinarse con la extracción de agua de acuíferos, permite poner en regadío una superficie considerable cada año. En cualquier caso, y como ya se ha dicho anteriormente, la distribución de esta agua disponible no es uniforme a lo largo de la superficie española, lo que genera importantes desigualdades entre regiones.

Como respuesta a los distintos climas y orografía de España, los suelos que se encuentran son también muy diversos [3]. Entre los suelos agrícolas de España, una parte muy importante de la superficie son cambisoles, suelos desarrollados sobre distintos tipos de roca y evolución por lo que dan lugar a suelos de propiedades muy variables. Similares a estos, y también ocupando una superficie representativa, se encuentran los umbrisoles, parecidos a los anteriores, pero de alto componente húmico y/o ácido. También tienen importancia en superficie, además de tener alto interés agrícola, los fluvisoles, formados a partir de materiales aluviales recientes de los ríos. En la zona oriental también destacan

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468





en superficie los calcisoles y gypsisoles, formados bajo condiciones áridas o semi-áridas. Y, en el lado opuesto, en la zona centro-occidental, se encuentran luvisoles, formados bajo condiciones de fuerte lavado de arcillas. Finalmente, en algunas cuencas de la zona sur hay una presencia importante de vertisoles, de alto contenido en arcillas expansibles y también con alto interés agrícola.

Considerando solamente la superficie agrícola (tierra ocupada por cultivos y barbechos, pero no las praderas), esta se reduce a 167,704 km2, solo un 33% de la superficie total. En 2018, de esta superficie, el 18.1% eran barbechos, el 29.1% cultivos leñosos y el 52.8% cultivos herbáceos. Los casi 9 millones de hectáreas de cultivos herbáceos registrados en 2018, han permanecido relativamente constantes durante los últimos 10 años, oscilando entre los 8.72 y los 9.24 millones de hectáreas. El tamaño medio de las explotaciones agrícolas en 2016 fue de 18.25 ha/explotación (similar a las 16.5 ha/explotación de la UE), aunque este tamaño se reduce a 3.1 ha/explotación en el caso de áreas en regadío.

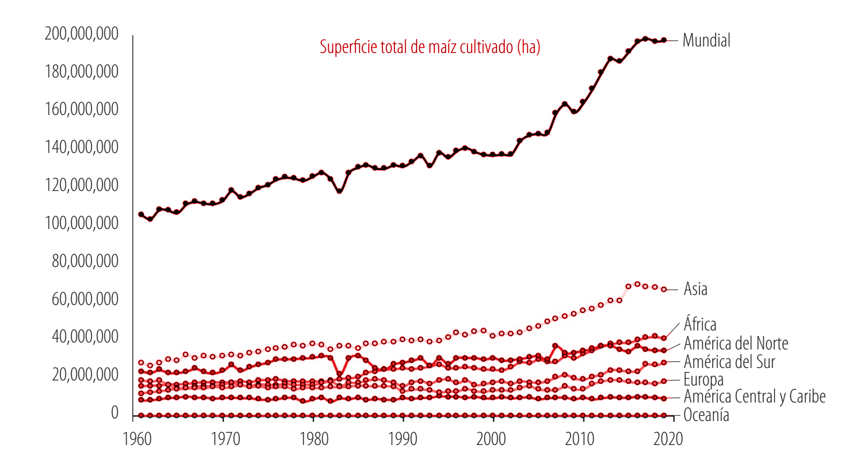
Según la FAO el maíz es el segundo cultivo en producción mundial, con 1,148 Mt, el 38.5% de la producción total de cereales, y solo superado por la caña de azúcar y seguido por el trigo [4]. Su importancia es aún mayor cuando se estima que su producción aumentará en 375 Mt hasta alcanzar unas 3,054 Mt en 2029. El objetivo es alcanzar dicho aumento principalmente en base a un incremento en el rendimiento y no por una mayor superficie cultivada. Por otro lado, la cada vez mayor concienciación a nivel global de que la producción agrícola debe reducir su impacto medioambiental (con normativas mucho más restrictivas) [5], fomenta que la cantidad de insumos agrícolas debe ser menor y estar mejor manejada. Por eso, producir más maíz con una mayor eficiencia económica, pero también con un menor impacto medioambiental, se convierte en un reto cada vez más esencial tanto para los agricultores españoles como para el resto del mundo.

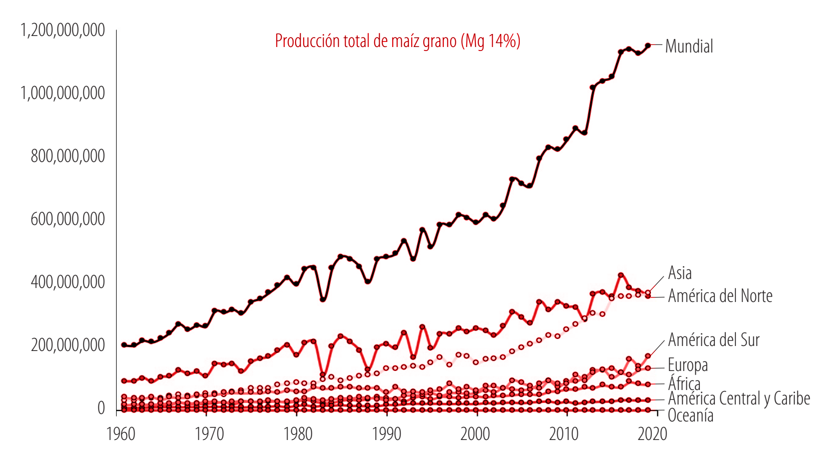
SITUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ESPAÑOLA FRENTE A LA PRODUCCIÓN MUNDIAL

Tanto la superficie cultivada a nivel mundial, como el rendimiento medio por hectárea han aumentado notablemente durante las últimas décadas, dando lugar a un aumento generalizado de la producción mundial (Fig. 2). La superficie cultivada total pasó de 105.6 millones de hectáreas en 1961, a 137.5 en 2002, con un punto de inflexión de 196.8 millones en 2018. En cuanto al rendimiento medio, el crecimiento ha sido más lineal, tanto a nivel mundial como a nivel regional. En este caso, los rendimientos medios mundiales pasaron de 1,942 kg de grano al 14% por hectárea en 1961 a 5,715 en 2018. Finalmente, como resultado de los incrementos en la superficie y el rendimiento, la producción de grano mundial pasó de 205.0 millones de Mg de grano al 14%, a 603.6 en 2002, donde de nuevo se produce un importante punto de inflexión en 2018 que alcanza los 1,124.7 millones de Mg de grano [4].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468







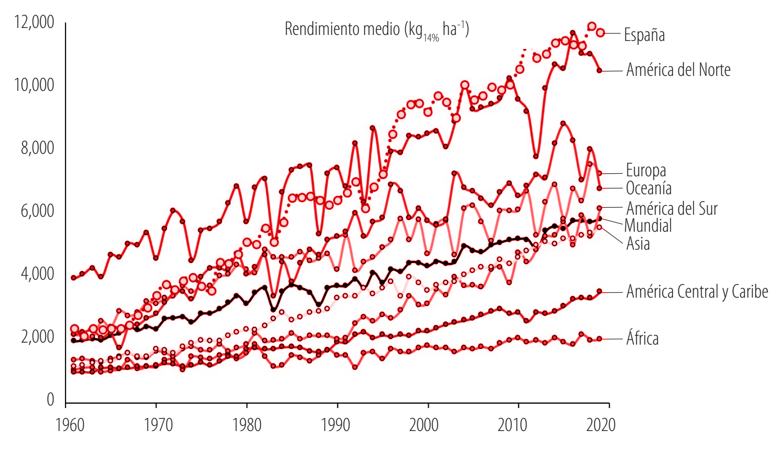
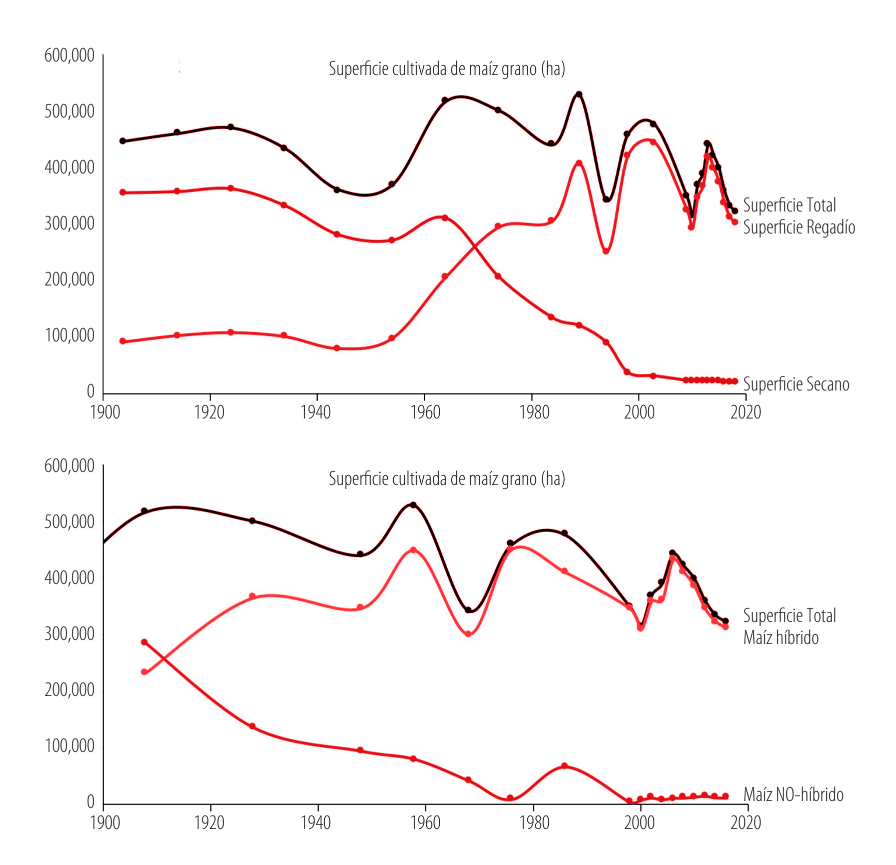


Figura 2. Superficie, Producción y Rendimientos obtenidos anualmente en las distintas regiones del mundo. Gráficos elaborados por los autores en base a los datos de FAOSTAT.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468



Si se considera los datos actuales en España, en 2018 la superficie cultivada de maíz grano fue de 322,370 ha (Fig. 3), representando solo el 0.16% de la superficie mundial. De esta superficie mundial, un 34% se concentra en Asia, seguidos de lejos por África (21%), América del Norte (17%) y América del Sur (13.5%). Por otro lado, la producción se presenta más igualada entre regiones (Fig. 2), dado que de los 1,125 millones de Mg de grano al 14% de humedad producidos en 2018, Asia mantiene un 32% de la producción total, pero América del Norte se eleva al 34%, mientras que América del Sur mantiene un 12%, Europa aumenta al 11% y África baja al 7%. En este caso la producción de España, en la línea europea, asciende al 0.34% de la producción mundial, con 3.8 millones de Mg de grano al 14%. Este incremento se debe, principalmente a que el rendimiento medio en España es actualmente uno de los más altos del mundo. Este rendimiento se elevó en España a los 11,919.6 kg de grano al 14% por ha (Fig. 2), ligeramente superior al rendimiento medio de América del Norte (11,017.5 kg de grano al 14% por hectárea) y muy por encima de la media mundial (5,715.1 kg de grano al 14% por hectárea) o incluso del rendimiento medio en Europa (7,528.2 kg de grano al 14% por hectárea).



 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468





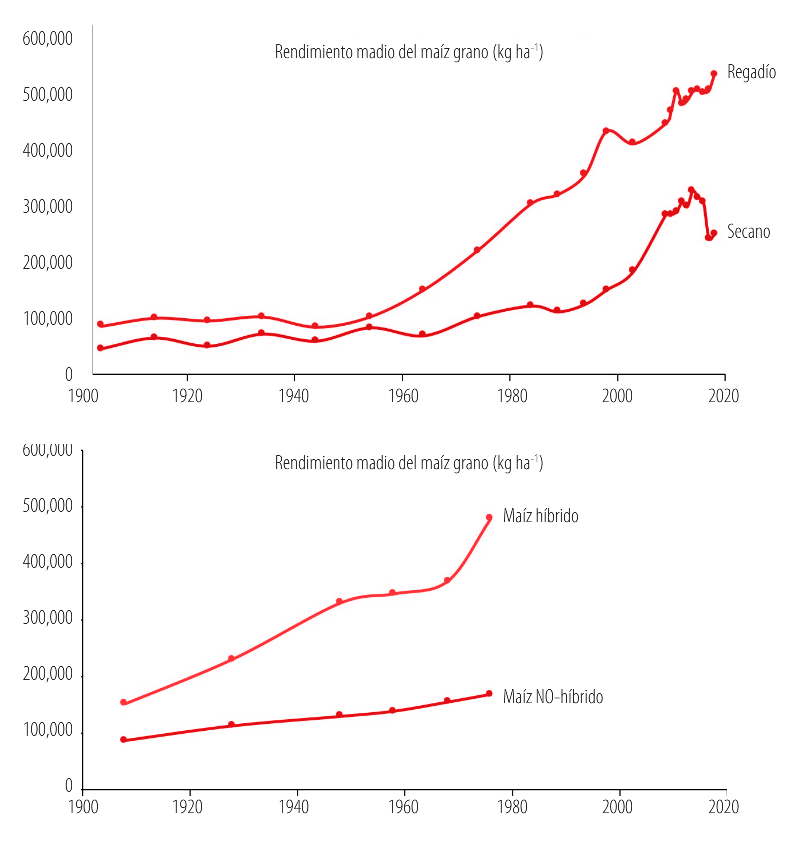
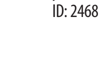


Figura 3. Superficie cultivada y rendimiento medio obtenido en España en función de la presencia de riego o no y del tipo de semilla utilizado. Gráficos elaborados por los autores en base a los datos de Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España.

EL REGADÍO COMO POTENCIADOR DE LA PRODUCCIÓN

Desde 1900 a 1960, los rendimientos medios observados en España (Fig. 3) no sufrieron variaciones importantes más allá de las fluctuaciones debidas al clima [1]. Ya en 1960, los rendimientos obtenidos en España fueron muy similares a los obtenidos de media mundial (~2,000 kg de grano al 14% por ha), en la misma línea de los kilogramos obtenidos de media en Europa o en América del Sur, y muy por debajo de los ~4,000 kg obtenidos en América del Norte. Durante los siguientes 20 años, el aumento en rendimiento fue similar en estas 4 regiones (América del Norte y del Sur, Europa y España), desmarcándose progresivamente de la media mundial. Este incremento, fue probablemente inducido en parte por la mejora de productos fertilizantes y fitosanitarios, así como por la aparición de los nuevos híbridos en el campo. Por ejemplo, en España, se pasó de solo un 45% de la superficie de maíz sembrada con semilla híbrida en 1964 a un 80% en 1984, y hasta un 98% en 1998 [1].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468




A partir de 1980, la producción en España creció a un ritmo mucho mayor que el resto de regiones mundiales, sobre todo entre 1990 y 1995. Estos grandes aumentos vinieron de la mano de la generalización del cultivo de maíz en regadío. Analizando los datos de superficie de maíz regada en 1964, se puede ver como solo el 40% de la superficie cultivada con maíz tenía riego. Sin embargo, en 1984 ya estaba regada el 70% de la superficie, hasta que, en 1998, coincidiendo con la gran tasa de aumento observada en los rendimientos, ya se alcanzaba el 92%. Cabe destacar que los rendimientos observados de secano en España, se ajustan mejor a los rendimientos medios obtenidos a nivel mundial (5,749 kg de grano al 14% por ha en 2018), mientras que los obtenidos en regadío han alcanzado una media de 12,328 kg de grano al 14% por ha en 2018 en España [1] (Fig. 4).

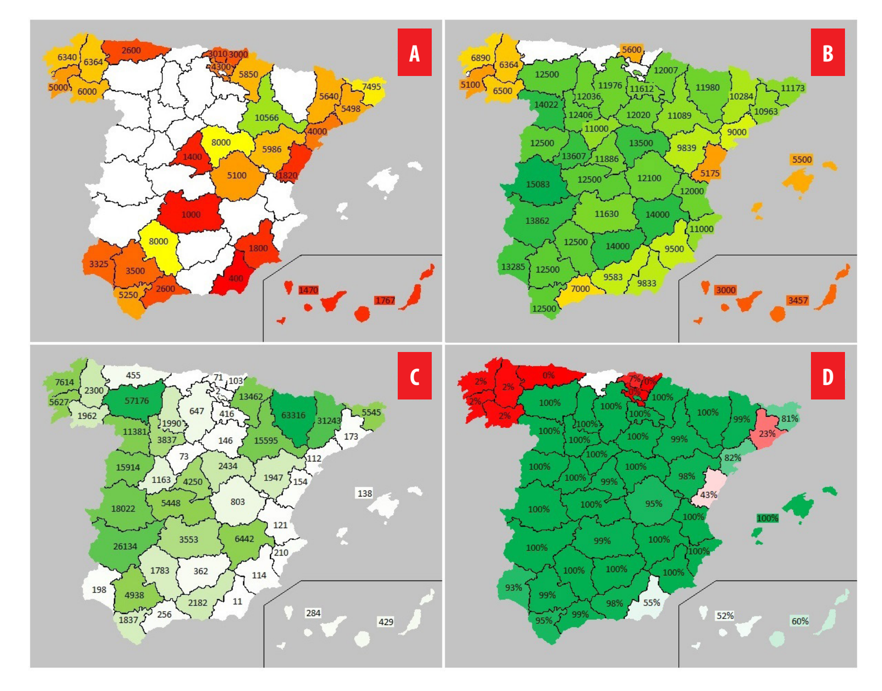


Figura 4. Datos provinciales de 2018 de rendimiento medio (en kg de grano al 14% por ha) obtenido en secano (a) y en regadío (b), superficie total cultivada con maíz en ha (c) y porcentaje de la superficie cultivada en regadío (d). Mapas elaborados por los autores en base a los datos de Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España.

No obstante, España tiene una gran variabilidad edafo-climática por lo que tanto la superficie cultivada, como el porcentaje de esta superficie bajo condiciones de riego y el rendimiento varían enormemente en función de la posibilidad/necesidad de riego. Aunque en casi todas las provincias españolas se puede encontrar maíz para grano, en general las regiones de este cultivo situadas en el este y el sur de España son testimoniales, ya que en estas zonas se suele destinar el agua de riego a cultivos de mayor rentabilidad económica como las frutas y hortalizas. Solo entre Huesca y León se concentra un tercio de la superficie total cultivada (si se añaden las de Lérida, ya

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468



representan casi la mitad). En cualquier caso, la mayor parte de la producción de maíz se concentra entre el norte y el oeste de España (Fig. 4).

En cuanto al porcentaje de maíz en regadío, como ya se observó a nivel nacional, la mayor parte de las provincias presentan valores superiores al 95%. (Fig. 4) Sin embargo, cabe destacar que, en la Cornisa Cantábrica, donde las lluvias son más abundantes, el regadío es una técnica muy poco utilizada a la hora de cultivar maíz. En cualquier caso, en esta región no se observan grandes mejoras en el rendimiento cuando se introduce el riego, mientras en el resto de España se observan claras mejorías en los rendimientos medios con el riego. De hecho, al analizar los rendimientos por provincias se observa como en algunas de ellas se llega a rendimientos medios de hasta 15,083 kg de grano al 14% por ha, como en Cáceres en 2018, considerando que en esta provincia se integran datos de más de 18,000 ha [1].

EL MANEJO DEL AGUA

El agua es uno de los factores limitantes para la producción de maíz. La disponibilidad de agua permite que cada planta aumente su crecimiento y su rendimiento, pero también permite aumentar las densidades de siembra, por lo que el rendimiento por hectárea también aumenta considerablemente (Fig. 3). Para mejorar la disponibilidad de agua hay varias formas de actuar [6]. Por un lado, está la opción de aumentar el riego, pero como las reservas de agua de una cuenca son limitadas, cuanto más eficiente sea el sistema de riego (tanto en la forma de aplicar el agua como en el lugar y los momentos en los que se aplica), mayor es el potencial para regar más superficie. Por otro lado, está la opción de evitar que el agua que ya existe en el suelo se pierda. Una parte importante del agua del suelo se pierde por evaporación directa, sin ningún tipo de efecto positivo para el cultivo, sobre todo durante las fases en las que el maíz aún no cubre el suelo. Por tanto, contar con acolchados artificiales o vegetales que eviten esta evaporación directa (o que incluso protejan del viento y disminuyan la temperatura del suelo) pueden marcar la diferencia entre unos rendimientos económicamente sostenibles o no [7].

Otra parte importante de las pérdidas de agua de los suelos se producen por drenaje y/o escorrentía [8]. Para evitar el drenaje, se puede contar con tuberías de drenaje que permitan reciclar las aguas profundas, pero en el caso de parcelas regadas se busca ajustar el riego para evitar estos eventos de drenaje y el lixiviado de nutrientes asociado a él [9]. Con el fin de evitar la escorrentía, sobre todo en parcelas con pendiente, se debe recurrir a cubiertas vegetales (vivas o muertas) que favorezcan la velocidad de infiltración del agua a la vez que reducen la velocidad del movimiento del agua en superficie, aumentando en gran medida el agua realmente disponible para el maíz, y evitando a la vez la erosión de la capa superficial más productiva del suelo [10].

Finalmente, otra forma de mejorar la disponibilidad de agua sería utilizando la estructura natural del suelo para aumentar la capacidad de retención de agua [11]; para ello, técnicas como el no laboreo, potenciar el desarrollo de raíces todo el año (mediante el empleo de rotaciones y cubiertas vegetales) y el aumento de la materia orgánica del suelo, son herramientas clave para mejorar esta propiedad [12].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468



EL MANEJO DE LA FERTILIZACIÓN

Muy ligado al manejo del agua se encuentra el manejo de los nutrientes [6]. Los nutrientes que el maíz necesita provienen principalmente de dos fuentes: los nutrientes que se aplican externamente en forma de fertilizantes orgánicos o inorgánicos y los nutrientes que el propio suelo suministra de manera natural [13]. Empezando por los nutrientes que aporta el suelo, parte de ellos son compuestos iónicos que quedan retenidos formando complejos con las arcillas y la materia orgánica del suelo. Por este motivo, suelos ricos en arcilla y/o materia orgánica, suelen ser suelos fértiles, al ser capaces de retener de forma natural muchos nutrientes que se irán poniendo a disposición del cultivo a medida que los va necesitando [6].

Aunque el contenido de arcillas difícilmente se puede incrementar, la materia orgánica se puede aumentar de forma constante con los residuos de cultivo que se quedan en el campo, fomentado el crecimiento de raíces durante todo el año (incluyendo cubiertas vegetales), reduciendo las labores del suelo y/o aportando enmiendas orgánicas externas. Pero más allá de los nutrientes que se quedan retenidos en la materia orgánica del suelo, están los propios nutrientes que se generan por la mineralización de esa materia orgánica. Para el desarrollo óptimo del proceso de mineralización se requiere al mismo tiempo de la disponibilidad de agua y temperaturas apropiadas [14]. Por tanto, un aumento en el contenido de la materia orgánica del suelo es recomendable en casi todas las situaciones.

El aporte de fertilizantes externos permite suministrar al cultivo aquellos nutrientes que el suelo no es capaz de suministrar en cantidad suficiente para el correcto desarrollo del cultivo. En este caso, es importante conocer bien qué y cuántos nutrientes aporta el suelo y qué nutrientes (macro y micro) son los más limitantes. Según la ley de Liebig, el nutriente más limitante es el que marca el techo de producción, por lo que un mayor aporte de otros nutrientes, en general, no va redundar en mejores rendimientos hasta que la carencia del más limitante se corrija. Por tanto, los análisis de suelo y planta son fundamentales para evitar sobre-fertilizaciones que reducirían drásticamente la sostenibilidad económica y aumentarían el impacto medioambiental de una explotación.

La aplicación de un fertilizante adicional debe cumplir el principio de las 4 R's (por sus siglas en inglés) para que sea eficiente: cantidad correcta, momento correcto, fertilizante correcto y lugar correcto. Si la cantidad aplicada es muy alta, una parte importante del fertilizante se perderá por lavado (contaminando acuíferos y masas de agua) [15] o por emisiones gaseosas (aumentando la concentración de partículas en suspensión en el aire y de gases de efecto invernadero) [16]. Por el contrario, si la aportación de fertilizante es muy baja, pude producir deficiencias de un nutriente concreto (o de varios) y dar lugar a mermas en el rendimiento. El momento de aplicación también tiene gran importancia, ya que si se aplica demasiado pronto también se perderá antes de que el cultivo pueda asimilarlo, pero si se aplica tarde el maíz no podrá usarlo a tiempo [6]. Por eso, es importante tanto conocer que los mayores requerimientos nutricionales en el maíz se producen entre la fase de 4-6 hojas y la floración, cuando el crecimiento de la biomasa es más rápido. Igual de importante es conocer la velocidad con el que los nutrientes están disponibles con cada tipo de fertilizante, porque fertilizantes que están rápidamente disponibles (como el nitrato amónico) actúan de diferente manera que

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468



fertilizantes de liberación lenta (como los fertilizantes con inhibidores, los encapsulados o los fertilizantes orgánicos). Por tanto, es necesario ajustar la fecha de aplicación lo máximo posible para que la liberación se acople a la demanda real del maíz [17].

En este sentido, se enlaza con el principio del fertilizante correcto, ya que se debe usar en cada momento el fertilizante por composición que se ajuste mejor a la forma de absorción del cultivo. Sin embargo, esto también afecta a la calidad del fertilizante o a la forma de aplicarlo, ya que no todas las presentaciones funcionan igual. Por último, es importante aplicar el fertilizante cerca de las raíces y favorecer que puedan ser absorbidos, sobre todo, en el caso de nutrientes poco móviles como el P o el K. Por tanto, aplicar en superficie es solo interesante si los nutrientes son altamente solubles y se incorporan con un riego o una lluvia. Si no lo son, sería más recomendable incorporarlos bien con una labor ligera, inyectándolos directamente o incluso aplicándolos con la sembradora. No obstante, si la dosis es muy alta puede producir fitotoxicidad.

En el caso de España, no hay datos específicos del consumo de fertilizantes asociados únicamente a la producción de maíz. Según distintos informes de la Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes [18], ni el consumo total de fertilizantes ni la distribución del consumo por tipos de fertilizantes han sufrido grandes cambios en las últimas dos décadas (Fig. 5). Por ello no cabe esperar grandes cambios para el maíz. Para el cálculo de este consumo total por parte de los agricultores se considera tanto el total de fertilizantes de producción nacional (en torno a los 4.5 millones de Mg de producto terminado en 2018), como el total de fertilizantes importados (en torno a los 3.0 millones de Mg en 2018) y a esto se le descuenta el total de fertilizantes exportados (en torno a los 2.3 millones de Mg en 2018). Las mayores variaciones interanuales se deben más al precio puntual de los propios fertilizantes que a cambios reales en las prácticas culturales de los agricultores.

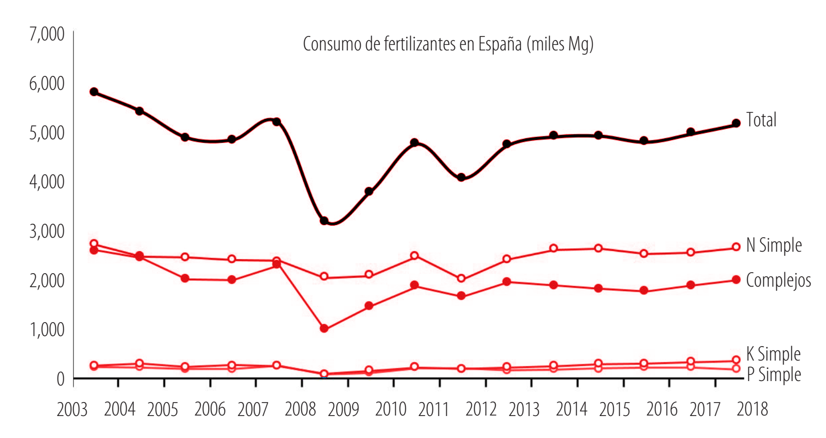


Figura 5. Consumo total de fertilizantes de la agricultura española. Gráficos elaborados por los autores en base a los datos de ANFFE.

Los Balances Nacionales de N y P que elabora el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [1] señalan que el grupo de cultivos de "Cereales en regadío" suponen en torno a 1/3 del peso de la superficie cultivada corresponde al maíz. Para estos cereales

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468




de regadío en España se estimó en 2017 un consumo de 189,466 Mg N y 32,233 Mg P en forma de fertilizantes minerales, así como de 52,958 Mg N y 14,240 Mg P en forma de otros fertilizantes orgánicos. Según estas estadísticas se volatilizaron 25,737 Mg N procedentes del abonado, a lo que se deben añadir otros 3,133 Mg N que se pierden en forma de otras emisiones gaseosas, que quedaron compensadas en parte con las 10,698 Mg N que se estima que se incorporan a esos suelos mediante procesos de deposición [1]. Con estos datos, se estiman unas pérdidas anuales medias de 83.9 kg N por ha, de las cuales 25.5 son en forma gaseosa y 58.4 en forma de lixiviado o de escorrentía. En cuanto al P, las pérdidas anuales se estiman en 3,8 kg P/ha, sin contabilizar el P que queda inmovilizado en el suelo [1]. Estos datos indican que, considerando el N y el P extraído por el maíz en el grano y la paja (en torno a los 14.89 kg N y 4.36 kg P por Mg grano al 14% y a los 1.00 kg N y 0.29 kg P por Mg de paja seca), la eficiencia en el uso de los fertilizantes puede aumentar aun enormemente.

LA SEMILLA

Desde los años 60, existe una mejora muy importante en el potencial de rendimiento de los distintos híbridos frente a variedades tradicionales (con una diferencia máxima registrada en 1998 de 3,377 frente 9,585 kg de grano al 14% por ha de rendimiento medio en España [1]). Estas diferencias se estiman aún mayores en la actualidad, ya que la mejora en estas variedades no híbridas no ha sido destacada mientras que el rendimiento potencial de los nuevos híbridos sí que ha experimentado un importante crecimiento. Estos híbridos de calidad aseguran mejores tasas de germinación, lo que permite ajustar mejor la dosis de siembra y evita problemas de mala nascencia. Por otro lado, garantizan una homogeneidad mayor entre plantas, lo que facilita el manejo integral de la parcela a la hora de realizar operaciones en campo como la aplicación de fitosanitarios, tratamientos mecánicos del suelo, o incluso, la cosecha. También se incluyen en los planes de mejora la mayor resistencia del cultivo frente a estreses bióticos (plagas y enfermedades) y abióticos, (déficit o exceso hídrico y temperaturas demasiado altas o bajas). Las nuevas variedades aseguran mejores tasas de translocación de nutrientes de la planta al grano, así como un mayor tamaño de las mazorcas, con más granos y de mayor tamaño [19].

En base a los datos de rendimiento, facilitados por las grandes empresas de semillas con distribución en España, los rendimientos a nivel de parcela registrados alcanzaron valores máximos de hasta 22,454 kg grano al 14% por ha en 2020, hasta 20,600 en 2019 o hasta 23,590 en 2018. Estos rendimientos se obtuvieron principalmente en las zonas del norte de España y, aunque varía con los años, las provincias que más veces aparecen en las primeras posiciones de estos concursos fueron León, Huesca, Zamora, Lérida, Salamanca y Cáceres.

En cuanto a los ciclos de los híbridos con los que se alcanzan estos rendimientos, no siempre los ciclos más largos produjeron más, y se encuentran muy ajustados a la región en la que se cultiven. En base a los ciclos definidos por la FAO para el cinturón maicero estadunidense (que va desde el ciclo 200 -de unos 85 días hasta la maduración- y el 1000 -de más de 161 días hasta la maduración-), en León, por ejemplo, se alcanzaban estos rendimientos con híbridos de ciclo 400 (excepcionalmente el 500), en Zamora y Salamanca (ligeramente más al sur y con algo más de calor) se alternaban ciclos 400-500, mientras que en Huesca, Lérida y Cáceres (con menor altitud y mayores temperaturas estivales) se

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468





recurrió principalmente a ciclos 700. Finalmente, según estas empresas, las principales características que buscan los agricultores entre los diferentes híbridos, más allá de los mejores rendimientos potenciales, varían por zonas. Por ejemplo, en el Valle del Duero se buscan variedades resistentes a la caída del tallo; en Galicia se buscan variedades resistentes a *Helminthosporium*; en el Valle del Ebro variedades resistentes al taladro (*Ostrinia nubilalis*), *Giberella* y al *Fusarium* de la mazorca; y en la zona Madrid, Castilla-La Mancha y Extremadura variedades resistentes a *Cephalosporium* y con alta calidad de grano.

Cabe destacar también el potencial de las semillas transgénicas, de gran uso a nivel mundial, o incluso las variedades mejoradas por las novedosas técnicas de edición génica. Pero, en cualquier caso, en Europa actualmente no están permitidas, a excepción de algunas variedades del tipo Bt (con genes procedentes de *Bacillus thuringiensis* para la lucha contra de la plaga del taladro), estando su uso potencial muy limitado a regiones muy concretas de España (y otras regiones de Europa), como el Valle del Ebro. Por eso en este trabajo no se han tenido en consideración.

LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Agrupando las técnicas anteriores se encuentra la agricultura de precisión, ya que trata de aplicar todos esos principios de eficiencia en el uso de agua, nutrientes, fitosanitarios y semilla, pero reduciendo la aplicación de estas técnicas a la escala de metros cuadrados en vez de a la escala de finca. Cada parcela o finca tiene variaciones intrínsecas en las propiedades del suelo, la fertilidad, el relieve, el microclima, entre otros, que hacen que los potenciales y las necesidades de cada zona sean distintas. Si se tiene la capacidad de identificar esa variabilidad, junto con la maquinaria adecuada, se puede ajustar la dosis de semilla, la dosis de fertilizante, el riego, los tratamientos fitosanitarios, etcétera, a cada una de esas zonas en vez de aplicar un valor medio para toda la parcela. De esta forma se evitan los gastos innecesarios derivados de la aplicación excesiva de insumos en las zonas poco productivas y el descenso de los beneficios derivados de los menores rendimientos en las zonas de mayor potencial de las zonas más productivas.

Para este fin existen muchas herramientas. Entre estas herramientas se encuentran los mapas de suelos (que pueden monitorizar textura, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, pedregosidad, contenido de agua, etcétera, y todo ello en superficie o a distintas profundidades), los mapas de rendimiento, mapas con diferentes índices de vegetación, las predicciones meteorológicas, etcétera. Toda esta cartografía se puede generar con muestreos de planta y/o suelo en campo, con el uso de sensores proximales, con sensores montados en la maquinaria o mediante teledetección a distintas distancias (dron, avioneta, satélite). Todo este flujo de datos públicos o privados se integra en las distintas plataformas (de nuevo públicas o privadas) que cada vez dan mayor servicio a los agricultores. No obstante, para ello hace falta una inversión tanto en información (y gestión de la misma) como en maquinaria que permita la aplicación de estos valores variables en el uso de semilla, fertilizantes y fitosanitarios, por lo que es necesaria una adaptación progresiva y superficies grandes y suficientemente variables como para rentabilizar esta inversión. En cualquier caso, en España se cuenta con numerosas empresas que ofrecen estos servicios (por ejemplo, AgriSat [20], FieldView [21], o HispatecAgro [22]), así como herramientas públicas de libre disposición (sigAGROasesor [23]).

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468





EL FUTURO DEL MAÍZ EN ESPAÑA Y SUS PRINCIPALES LIMITANTES

A día de hoy, hay dos principales factores limitantes para el aumento de la superficie cultivada de maíz y su rendimiento que son: la disponibilidad de agua y la rentabilidad económica. El maíz es un cultivo altamente productivo, pero estos rendimientos no siempre dan lugar a mejor rentabilidad, ya que los costes de producción también son mayores y el precio del grano suele ser bajo. En las épocas en las que el precio del grano sube, la superficie cultivada en España tiende a subir, mientras que cuando baja de precio, la superficie también tiende a descender. En cualquier caso, el precio de los mercados locales depende en gran medida del mercado mundial, por ser un producto de fácil conservación y con una buena capacidad de transporte, por lo que los agricultores tienen poco poder de influencia en él. Sin embargo, la rentabilidad también se ve influida por el coste y la cantidad de insumos utilizados para su cultivo. En esta parte, los agricultores sí tienen un mayor margen de maniobra.

Finalmente, se encuentra el problema de la limitación de agua en una situación de cambio climático, donde el agua es cada vez un elemento más escaso para todos los ámbitos de la vida. En estas circunstancias, los cultivos con altas demandas de riego requieren ser muy eficientes a nivel económico y medioambiental, ya que, si no, tenderán a ser reemplazados por otros cultivos mejor adaptados. Por eso, los agricultores que deseen seguir cultivando maíz en España, además de ser capaces de mejorar sus márgenes de producción, deberán ser capaces de optimizar el uso de cada gota de agua utilizada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida por el proyecto Tech-Maiz (Financiado por el CYTED), al MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/ (proyecto AGL2017-83283-C2-2-R) y a la Comunidad de Madrid (proyecto AGRISOST-CM S2018/BAA-4330), cofinanciado en el marco del Programa Operativo FSE y FEDER 2014-2020, que han resultado fundamentales para la preparación de este trabajo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

José L. Gabriel concibió la investigación, reunió los fondos, diseñó la metodología, recopiló los datos, preparó las tablas y las figuras y redactó un primer borrador del manuscrito; Todos los autores participaron en el análisis de datos, de la validación de los resultados y de la revisión crítica del contenido del manuscrito hasta alcanzar la versión final del mismo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en el presente trabajo.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468



REFERENCIAS

[1] MAPA (2020). Anuarios de Estadística. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. Recuperado de: https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx

[2] Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol. Earth Syst. Sci. 11, 1633–1644. doi: https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007

[3] Instituto Geográfico Nacional. 2021. Mapas de España. Recuperado de: https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/

[4] FAOSTAT (2021). Roma, Italia. Recuperado de: https://www.fao.org/faostat/en/

[5] Comisión Europea, 2019. El Pacto Verde Europeo. Bruselas, Bélgica. Recuperado de: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN

[6] Quemada, M., Gabriel, J.L. (2016). Approaches for increasing nitrogen and water use efficiency simultaneously. Glob. Food Sec. 9, 29–35. doi: https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.05.004

[7] Alonso-Ayuso, M., Gabriel, J.L., Hontoria, C., Ibáñez, M.A., Quemada, M. (2020). The cover crop termination choice to designing sustainable cropping systems. European Journal of Agronomy 114, 126000. doi: https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126000

[8] Gabriel, J.L., Muñoz-Carpena, R., Quemada, M. (2012). The role of cover crops in irrigated systems: water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. Agric. Ecosyst. Environ. 155:50–61. doi: https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.021

[9] Gabriel, J.L., Quemada, M. (2017). Water Management for Enhancing Crop Nutrient Use Efficiency and Reducing Losses. En: Tei, F., Nicola, S., Benincassa, P., *Advances in Research on Fertilization Management of Vegetable Crops*. Springer Nature, Cham, Suiza. pp. 247-265.

[10] Alonso-Ayuso, M., Quemada, M., Vanclooster, M., Ruiz-Ramos, M., Rodriguez, A., & Gabriel, J.L. (2018). Assessing cover crop management under actual and climate change conditions. Science of the Total Environment 621, 1330–1341. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.095

[11] Gabriel, J.L., Quemada, M., Martín-Lammerding, D., & Vanclooster, M., (2019). Assessing the cover crop effect on soil hydraulic properties by inverse modelling in a 10-year field trial. Agricultural Water Management 222, 62–71. doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.034

[12] García-González, I., Hontoria, C., Gabriel, J.L., Alonso-Ayuso, M., & Quemada, M., (2018). Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. Geoderma 322, 81–88. doi: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.024

[13] Jarvis, S.C., Stockdale, E.A., Shepherd, M.A., & Powlson, D.S., (1996). Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. Adv. Agron. 57,187–235. doi: https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60925-6

[14] Quemada, M. (2004). Predicting crop residue decomposition using moisture adjusted time scales. Nutr. Cycl. Agroecosyst. 70, 283–291. doi: https://doi.org/10.1007/s10705-005-0533-y

[15] McIsaac, G.F., David, M.B., Gertner, G.Z., & Goolsby, D.A., (2001) Eutrophication – nitrateflux in the Mississippi river. Nature 414, 166–167. doi: https://doi.org/10.1038/35102672

[16] Schjoerring, J.K., Husted, S., Mäck, G., Høier, K., Finnemann, J., & Mattsson, M., (2000). Physiological regulation of plant-atmosphere ammonia exchange. Plant Soil 221, 95–102. Recuperado de: https://www.jstor.org/stable/42950737

[17] Allende-Montalbán, R., Martín-Lammerding, D., Delgado, M.d.M., Porcel, M.A., & Gabriel, J.L., (2021). Urease Inhibitors Effects on the Nitrogen Use Efficiency in a Maize–Wheat Rotation with or without Water Deficit. Agriculture 11, 684. doi: https://doi.org/10.3390/agriculture11070684

[18] ANFFE. (2021). Macromagnitudes Sectoriales 2020. http://www.anffe.com/informaci%F3n%20sectorial/macromagnitudes%20sectoriales/2020/index.html

[19] Paliwal, R.L., Granados, G., Lafitte, H.R., & Violic, A.D., (2001). El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Ed. FAO, Roma, Italia.

[20] AgriSat. 2021. Recuperado de: https://agrisat.es/





[21] FieldView. 2021. Recuperado de: https://climatefieldview.es/

[22] HispatecAgro. 2021. Recuperado de: https://www.hispatec.com/

[23] sigAGROasesor 2021. Recuperado de: https://www.agroasesor.es/es/

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2468